



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Concepção de um Espectrofotômetro Portátil no Espectro Visível

Autor: Fernando Vinícius Gonçalves de Souza
Orientador: Marcelino Monteiro de Andrade, Prof. Dr.

Brasília, DF
2014



Fernando Vinícius Gonçalves de Souza

Concepção de um Espectrofotômetro Portátil no Espectro Visível

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Marcelino Monteiro de Andrade, Prof. Dr.

Coorientador: Yuri Guimarães Dias, MSc.

Brasília, DF

2014

Fernando Vinícius Gonçalves de Souza

Concepção de um Espectrofotômetro Portátil no Espectro Visível/ Fernando
Vinícius Gonçalves de Souza. – Brasília, DF, 2014-
56 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Marcelino Monteiro de Andrade, Prof. Dr.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. Espectrofotômetro. 2. Visível. I. Marcelino Monteiro de Andrade, Prof. Dr.
. II. Yuri Guimarães Dias, MSc.. III. Universidade de Brasília. IV. Faculdade UnB
Gama. V. Concepção de um Espectrofotômetro Portátil no Espectro Visível

CDU

Fernando Vinícius Gonçalves de Souza

Concepção de um Espectrofotômetro Portátil no Espectro Visível

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 24 de Junho de 2014:

**Marcelino Monteiro de Andrade, Prof.
Dr.**
Orientador

Yuri Guimarães Dias, MSc.
Coorientador

**Marcelo Bento da Silva, Dr. UnB/
FGA**
Convidado 1

João Paulo Ataíde Martins, Dr.
CAESB/GDF
Convidado 2

Brasília, DF
2014

Resumo

Espectroscopia é a ciência que estuda as interações da radiação com a matéria. O equipamento que permite quantificar essas interações é chamado de Espectrofotômetro. A espectroscopia é aplicada em diversas áreas, como, por exemplo, na indústria alimentícia, indústria farmacêutica, ciência forense, astronomia, dentre outras. Tendo em vista essa gama de aplicações, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um espectrofotômetro multicanal portátil, voltado para análises na região visível do espectro. Uma breve descrição teórica é feita sobre os princípios físicos envolvidos nesta temática, além de discorrer sobre os principais componentes necessários para a confecção de um espectrofotômetro. A metodologia descreve uma solução com um conjunto óptico, utilizando um arranjo com monocromador de rede tipo Czerny-Turner. Descreve, também, uma solução com eletrônica embarcada, composta de circuitos analógicos para instrumentação de um CCD e de um microcontrolador ARM LPC2148 como objeto central de controle do espectrofotômetro construído. Alguns resultados são apresentados para validar a ideia proposta.

Palavras-chaves: Espectrofotômetro. Espectro Visível. CCD. ARM. LCP2148.

Abstract

Spectroscopy is the science that studies the interactions of radiation with matter. The equipment that is used to quantify these interactions is called a spectrophotometer. Spectroscopy is applied in various areas, for example in food industry, pharmaceutical industry, forensics, astronomy, among others. Given this range of applications, this paper aims at developing a portable multichannel spectrophotometer, focusing on the analysis in the visible region of the spectrum. A brief theoretical description is made on the physical principles involved in this issue, and discuss the main components necessary for making a spectrophotometer. The method describes a solution with an optical assembly using a monochromator arrangement of Czerny-Turner type network. It describes a solution with embedded electronics, analog instrumentation consists of a CCD circuit and a microcontroller ARM LPC2148 as the central control object spectrophotometer built. Some results are presented to validate the proposed idea.

Key-words: Spectrophotometer. Visible spectrum. CCD. Raspberry Pi. ARM.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação da relação entre campo elétrico, campo magnético e direção de propagação em uma onda eletromagnética. Retirado de (SKOOG et al., 2006).	21
Figura 2 – Espectro eletromagnético, em função do comprimento de onda (Em escala logarítmica).	22
Figura 3 – Esquema simplificado de absorção em uma amostra. Retirado de (SKOOG et al., 2006).	23
Figura 4 – Representação simplificada de um espectrofotômetro.	25
Figura 5 – Deslocamento do pico de emissão em função da temperatura. Retirado de (CARUSO; OGURI, 2006)	26
Figura 6 – Dispositivo de acoplamento de Carga, CCD.	27
Figura 7 – Representação do efeito da digitalização em um sinal de uma dimensão.	28
Figura 8 – Visão em blocos do sistema.	29
Figura 9 – Arranjo óptico utilizado na confecção do espectrofotômetro.	30
Figura 10 – Resposta espectral do TCD1201D. Retirado de (TOSHIBA, 1997).	31
Figura 11 – Interfaceamento entre um pino de I/O do LPC2148 e um pino de controle do CCD.	31
Figura 12 – Circuito de amplificação diferencial.	32
Figura 13 – Circuito de correção de <i>offset</i> .	33
Figura 14 – Circuito com ajuste de ganho referente ao terceiro estágio.	33
Figura 15 – Circuito conversor chaveado DC-DC.	34
Figura 16 – Circuito de acionamento da lâmpada.	35
Figura 17 – Fluxograma simplificado do <i>firmware</i> embarcado no LPC2148.	36
Figura 18 – Espectro de uma lâmpada de Hg. Adaptado de (GORE, 2000).	37
Figura 19 – Módulo óptico construído.	39
Figura 20 – Hardware eletrônico construído.	39
Figura 21 – Pontos coletados e curva do polinômio obtido da regressão.	40
Figura 22 – Espectro da lâmpada de Hg/Ar.	41
Figura 23 – Espectro da Lâmpada de Tugnstênio sem tratamento.	42
Figura 24 – Espectro da Lâmpada de Tugnstênio após filtragem.	42
Figura 25 – Espectros de emissão das soluções de CuSO_4 .	43
Figura 26 – Espectros de absorbância das soluções de CuSO_4 .	43
Figura 27 – Espectros de emissão das soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.	44
Figura 28 – Espectros de absorbância das soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.	45
Figura 29 – Absorção da solução de CuSO_4 .	46
Figura 30 – Relação entre erro e concentração para soluções de CuSO_4 .	46

Figura 31 – Diagrama de pulsos de controle do TCD1201D. Retirado de (TOSHIBA, 1997).	53
Figura 32 – Circuito de instrumentação analógica do sinal de proveniente do CCD.	55
Figura 33 – Circuito de alimentação.	56
Figura 34 – Circuito de <i>driver</i> do CCD.	56

Lista de tabelas

Tabela 1 – Picos da lâmpada de Hg/Ar coletados.	40
Tabela 2 – Análise de regressão linear cruzada para as soluções de CuSO_4 . Os valores de absorvância foram retirados da reta 750 nm.	44
Tabela 3 – Análise de regressão linear cruzada para as soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Os valores de absorvância foram retirados da reta 570 nm.	45

Lista de abreviaturas e siglas

CCD	Charge-Coupled Device
I/O	Input/Output
I ² C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
MISO	Master In Slave Out
CLK	Clock
CS	Chip Select
ADC	Analog-Digital Converter
DC	Direct Current
PLL	Phase-locked Loop
GPIO	General-purpose input/output

Lista de símbolos

λ	Comprimento de Onda
f	Frequência
E	Energia
h	Constante de Plank
P	Potência da Radiação Transmitida
P_0	Potência da Radiação Emitida
P_A	Potência da Radiação Absorvida
P_R	Potência da Radiação Refletida
T	Transmitância
A	Absorbância
ϵ	Absortividade Molecular
b	Comprimento do caminho óptico
c	Concentração da espécie absorvente
F_S	Fundo de Escala
F_D	Faixa Dinâmica
f_s	Frequência de Amostragem
T_s	Tempo de Amostragem
T_{int}	Tempo de Integração
p	Pixel

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização	19
1.2	Objetivos	19
1.3	Apresentação do Manuscrito	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Radiação Eletromagnética	21
2.1.1	Modelo Ondulatório	21
2.1.2	Espectro Eletromagnético	22
2.1.3	Modelo Quântico	23
2.1.4	As interações da radiação com a matéria	23
2.2	Espectrofotometria	24
2.2.1	Lei de Beer-Lambert-Bouguer	24
2.2.2	Instrumentação	25
2.2.2.1	Fonte de Radiação	25
2.2.2.2	Recipientes para Amostra	26
2.2.2.3	Aquisição Multicanal	27
2.2.2.4	Processamento da Informação	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Módulo Óptico	29
3.1.1	Caminho Óptico	29
3.1.2	Fonte de Radiação	30
3.2	Módulo Eletrônico	30
3.2.1	Microcontrolador	30
3.2.2	Controle do CCD	30
3.2.3	Conformação e Digitalização do Sinal	32
3.2.3.1	Instrumentação Analógica	32
3.2.3.2	Digitalização do Sinal	34
3.2.4	Circuito de Acionamento da Lâmpada	34
3.2.5	Firmware	35
3.3	Metodologia de Validação	36
3.3.1	Análise das Medidas de Absorção	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Construção do Protótipo	39

4.2	Calibração	40
4.3	Aquisições	42
4.3.1	Avaliação da Fonte de Radiação	42
4.3.2	Soluções de Sulfato de Cobre	43
4.3.3	Soluções de Dicromato de Potássio	44
4.4	Avaliação dos Resultados	45
5	CONCLUSÃO	47
	Referências	49
	ANEXOS	51
	ANEXO A – DIAGRAMA DE PULSOS DE CONTROLE DO CCD	53
	ANEXO B – CIRCUITO IMPLEMENTADO	55

1 Introdução

1.1 Contextualização

Espectroscopia é a ciência que estuda as interações da radiação com a matéria. Métodos espectrópicos de análise baseiam-se na mediação da quantidade de radiação emitida ou absorvida por moléculas e espécies atômicas (SKOOG et al., 2006). O equipamento que permite fazer tais medidas e análises é chamado espectrofotômetro. A espectroscopia é aplicada em diversas áreas, como por exemplo, na indústria alimentícia, indústria farmacêutica, ciência forense, astronomia, dentre outras.

O projeto AUTOBAC, desenvolvido em parceria entre a Universidade de Brasília e empresas de desenvolvimento de equipamentos na área clínica, coordenado pelo orientador deste trabalho, Prof.º Dr. Marcelino Monteiro de Andrade, busca desenvolver equipamentos clínicos para caracterização de bactérias através de soluções embarcadas, que contemplam técnicas de processamento de imagens e projeto de circuitos eletrônicos.

Tendo em vista a gama de aplicações existentes em espectroscopia, o custo moderado a elevado dos espectrofotômetros comerciais, o baixo custo e fácil acesso aos componentes eletrônicos no mercado atual, a relativa ausência de produtos nesta área da indústria nacional, bem como a possibilidade de desenvolver um equipamento dedicado e portátil, na temática do projeto AUTOBAC, o coordenador da proposta foi motivado a desenvolver um espectrofotômetro na região do espectro visível, com controle eletrônico embarcado e portátil.

1.2 Objetivos

Desenvolver um espectrofotômetro multicanal de feixe único, com região de interesse sendo o espectro visível, em plataforma embarcada. O desenvolvimento consiste em soluções de *hardware* e *software*. A parte de *hardware* consiste desde controle de uma fonte de radiação eletromagnética e a conformação dos feixes emitidos pela fonte, com o uso de colimadores e focalizadores, como também o dimensionamento de circuitos eletrônicos para instrumentação de transdutores e aquisições de dados de forma automatizada. A parte de *software* envolve elaboração de um *firmware* para controlar todo o *hardware*, e fazer a comunicação deste com um computador, para que um usuário possa fazer aquisições de espectros de absorção, visualizar na forma de gráficos os dados adquiridos de acordo com o comprimento de onda e obter análises quantitativas sobre as espécies de interesse presentes.

1.3 Apresentação do Manuscrito

No capítulo 2 é feita um levantamento teórico sobre os temas envolvidos neste trabalho. Uma breve descrição sobre radiação eletromagnética e um levantamento sobre os principais componentes de um espectrofotômetro são as bases desse capítulo. No capítulo 3 está descrito a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Os resultados obtidos seguindo a metodologia descrita estão no capítulo 4, e uma análise destes resultados é feita no capítulo 5. Por fim, uma conclusão é feita, recapitulando o que foi feito no trabalho, citando possíveis melhorias para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Radiação Eletromagnética

2.1.1 Modelo Ondulatório

Todo corpo a uma temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin) emite energia eletromagnética. A origem dessa energia eletromagnética está relacionada às vibrações dos elétrons. Essas vibrações geram um campo magnético oscilante, que por sua vez, gera um campo elétrico oscilante perpendicular ao campo magnético, e a variação de fluxo de campo elétrico volta a gerar um campo magnético. Essas interações descrevem o comportamento das ondas eletromagnéticas. O campo magnético, o campo elétrico e a direção de propagação em ondas eletromagnéticas são perpendiculares entre si, caracterizando-as como ondas transversais. Radiação eletromagnética nada mais é do que uma onda eletromagnética emitida por uma fonte. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

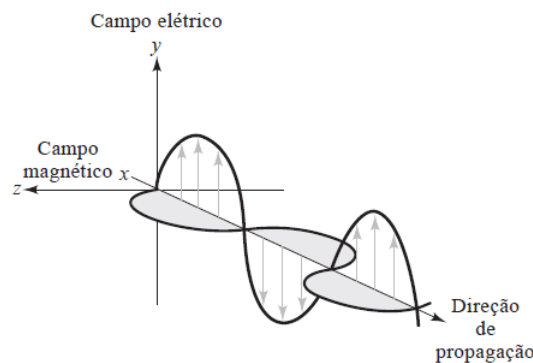


Figura 1: Representação da relação entre campo elétrico, campo magnético e direção de propagação em uma onda eletromagnética. Retirado de (SKOOG et al., 2006).

A frequência de oscilação do campo eletromagnético é o que determina a frequência (f) da onda eletromagnética, medida em Hertz (Hz) (1 Hz corresponde a um ciclo por segundo). Uma outra forma de caracterizar esse tipo de onda é através do comprimento de onda (λ), definido como a distância linear entre dois vales (ou duas cristas) consecutivas, medida na direção de propagação da onda. O produto entre comprimento de onda e frequência corresponde a velocidade de propagação da onda (v), como mostrado na equação 2.1. A frequência da onda é determinada pela fonte que a emite e é sempre constante, independentemente do meio que esta atravessa. Já a velocidade de propagação e o comprimento de onda dependem das características do meio, como densidade e elasticidade (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

$$v = f \cdot \lambda \quad (2.1)$$

No vácuo, todas as ondas transversais propagam-se a uma velocidade máxima c , conhecida como velocidade da luz no vácuo, cujo valor é igual a $2.99792 \cdot 10^8$ m/s. Em um meio contendo matéria, essa velocidade diminui devido as interações do campo eletromagnético da onda e os elétrons dos átomos e moléculas que constituem o meio. Como a frequência da onda permanece constante, o comprimento de onda diminui proporcionalmente a velocidade.

2.1.2 Espectro Eletromagnético

O que difere uma onda eletromagnética de outra é o seu comprimento de onda. O agrupamento dessas ondas em função de seus comprimentos, de maneira contínua, é conhecido como espectro eletromagnético. É comum classificar tipos de radiações eletromagnéticas por intervalos de comprimentos de onda. Na figura 2 é mostrado uma representação do espectro eletromagnético, com o espectro visível destacado.

O espectro visível é onde se encontra uma faixa de frequências na qual o olho humano é sensível, com o comprimento de onda indo de, aproximadamente, 700 nm (extremo vermelho) a 400 nm (extremo azul). Essa faixa é conhecida como luz visível, ou simplesmente, luz. É nessa região do espectro que este trabalho está direcionado.

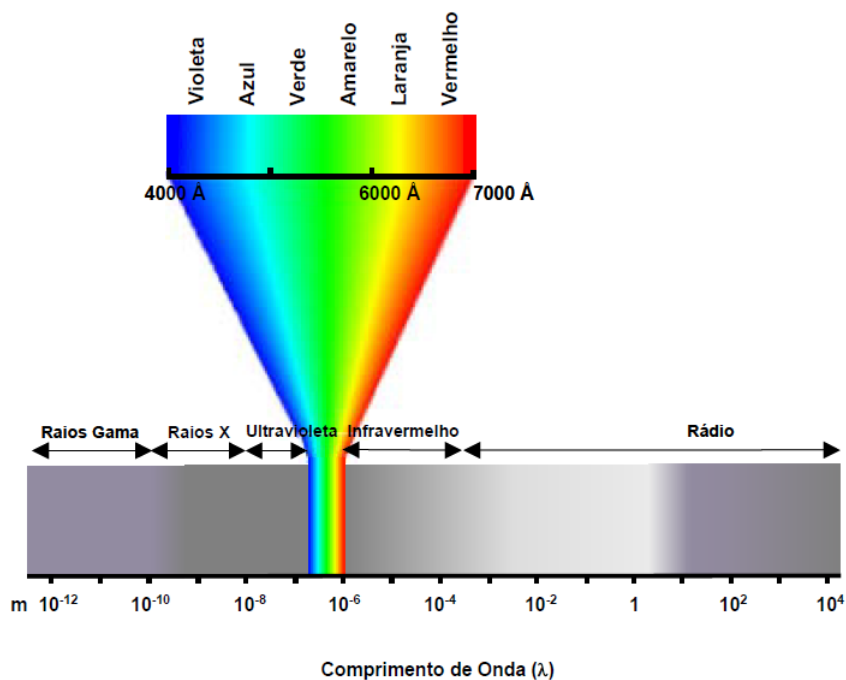


Figura 2: Espectro eletromagnético, em função do comprimento de onda (Em escala logarítmica).

2.1.3 Modelo Quântico

Quando a radiação eletromagnética é emitida ou absorvida, ocorre uma transferência permanente de energia do objeto emissor ou para o meio absorvente. Esse fenômeno foi explicado pela teoria do efeito fotoelétrico, formulada por Albert Einstein em 1905 (SKOOG et al., 2006). Einstein propôs que a radiação eletromagnética pode ser vista como um fluxo de partículas discretas chamadas fótons. A energia que um fóton transporta é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, e é descrita pela seguinte equação, conhecida como equação de Planck:

$$E = \frac{c \cdot h}{\lambda} \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, e h é a constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2013).

2.1.4 As interações da radiação com a matéria

Quando um meio homogêneo é atingido por luz monocromática ou policromática diversos fenômenos ocorrem. Parte dessa luz sofre reflexão, parte é absorvida pelo meio, parte sofre espalhamento e parte é transmitida, ou seja, atravessa o meio (VOGEL, 2008).

Radiações de determinados comprimentos de onda podem ser absorvidos por uma substância de acordo com sua estrutura molecular. A absorção de radiação ocorre quando um fóton incidente carrega energia equivalente a diferença de energia entre dois estados eletrônicos, promovendo a transição de um elétron de um estado energético menor para um de maior energia. Os elétrons excitados emitem essa energia na forma de radiação e retornam ao estado inicial (SKOOG et al., 2006). Uma explicação simplificada de um processo sem perdas pode ser vista na figura 3. Em 3-a uma amostra é incidida por uma radiação com potência P_0 e transmite uma potência P . Para que a absorção ocorra, a energia incidente deve ser equivalente às diferenças mostradas em 3-b. O espectro resultante é mostrado em 3-c.

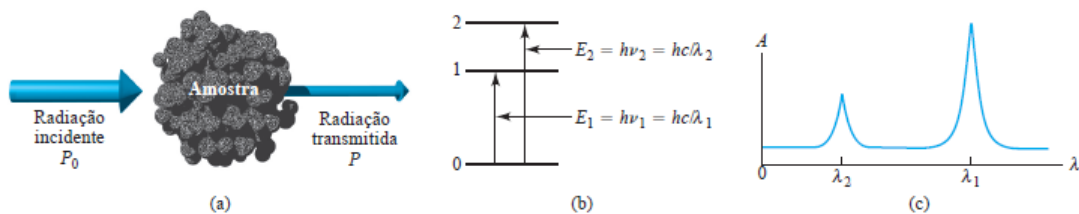


Figura 3: Esquema simplificado de absorção em uma amostra. Retirado de (SKOOG et al., 2006).

2.2 Espectrofotometria

Espectrofotometria é o método espectrométrico mais utilizado na determinação quantitativa de espécies de absorção (GORE, 2000).

2.2.1 Lei de Beer-Lambert-Bouguer

A lei de Beer-Lambert-Bouguer relaciona, quantitativamente, o quanto a atenuação da radiação depende da concentração das moléculas absorventes e do caminho óptico sobre o qual ocorre a absorção. Conforme a luz atravessa o recipiente contendo a amostra, uma diminuição da intensidade é observada na proporção em que a mesma é excitada. Quanto maior for o caminho óptico, maior será a atenuação da radiação, pois mais centros absorventes estarão no caminho (HOLLER et al., 2009).

A razão entre a potência incidente P_0 e a potência transmitida P é denominada Transmitância, e representado neste documento por T (Eq. 2.3). A transmitância é uma grandeza adimensional.

$$T = \frac{P}{P_0} \quad (2.3)$$

De acordo com Beer, a transmitância decai exponencialmente com o comprimento do caminho óptico do meio absorvente b e com a concentração da espécie absorvente c (HOLLER et al., 2009).

$$T = 10^{-\epsilon bc} \quad (2.4)$$

Na equação 2.3, ϵ é uma constante denominada absorvidade molar, e sua unidade mais usual é $\text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Para se obter uma relação linear com relação à b e c , toma-se o logaritmo em ambos os lados da Eq. 2.3. O produto ϵbc é definido como Absorbância, representada neste documento por A .

$$\log T = -\epsilon bc \quad (2.5)$$

$$A = \epsilon bc \quad (2.6)$$

Por fim, na Eq. 2.7, é mostrada a relação entre A , P e P_0 .

$$A = -\log \frac{P}{P_0} \quad (2.7)$$

Na prática, transmitância e absorbância não podem ser medidas como nas equações 2.3 e 2.7. O recipiente que contém a amostra influencia no processo de maneira

significativa, introduzindo os efeitos de espalhamento e reflexão, além do que, o mesmo pode, ainda que pequena, absorver uma parte da radiação emitida pela fonte (GORE, 2000).

Para medir a absorbância experimentalmente, o feixe que é transmitido pela solução contendo a amostra deve ser comparado com o feixe que é transmitido apenas pelo solvente, usualmente chamado de branco dos reagentes (HOLLER et al., 2009). Assim, a relação que corresponde a leitura na prática de absorbância é mostrada na equação 2.8.

$$A \approx -\log \frac{P_{\text{solução}}}{P_{\text{solvente}}} \quad (2.8)$$

2.2.2 Instrumentação

Espectrofotômetros possuem partes essenciais em sua estrutura, que estão presente independentemente da região espectral analisada. A saber:

- Fonte de energia radiante
- Monocromador
- Recipiente para amostra
- Transdutor de radiação
- Dispositivo de Leitura

Um diagrama simplificado da estrutura de um espectrofotômetro é mostrado na figura 4.



Figura 4: Representação simplificada de um espectrofotômetro.

2.2.2.1 Fonte de Radiação

A escolha da fonte de radiação varia de acordo com a região espectral que o equipamento analisa. Para uma boa análise quantitativa de absorção, faz-se necessário ter uma fonte de emissão de radiação com potência constante ou aproximadamente constante na região de interesse do equipamento, isto é, que não haja variação de potência com o comprimento de onda (HOLLER et al., 2009).

De maneira geral, as lâmpadas empregadas em espectrofotômetros que analisam uma faixa do espectro eletromagnético, isto é, que fazem aquisição multicanal, apresentam o perfil de emissão parecido com o de um corpo negro, visando obter um espectro de emissão contínuo, sem picos estreitos em um determinado comprimento de onda.

Outro fator que influencia na análise é o quão constante a temperatura da fonte se mantém. A radiação emitida por um corpo negro apresenta uma distribuição espectral dependente da temperatura, onde o produto da temperatura (T) pelo comprimento de onda para o qual a emissão por unidade de área é máxima (λ_m) é sempre constante (CARUSO; OGURI, 2006). Essa relação é conhecida como Lei de deslocamento de Wien (Eq. 2.9). Na figura 5 é possível observar o deslocamento no pico de emissão com o aumento de temperatura.

$$\lambda_m \cdot T = b \quad (2.9)$$

onde b é a constante de Wien ($2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$).

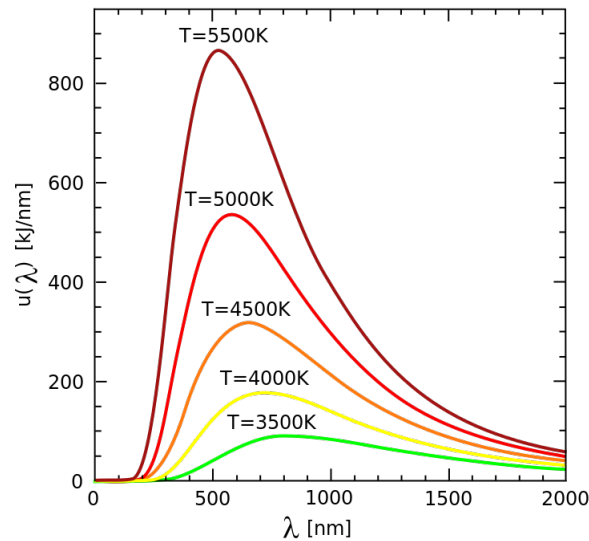


Figura 5: Deslocamento do pico de emissão em função da temperatura. Retirado de (CARUSO; OGURI, 2006)

Em espectrofotômetros com região espectral visível utilizam-se, em geral, lâmpadas de tungstênio-halogênio. Essas lâmpadas emitem radiação na região entre o vermelho extremo ($750\text{-}800 \text{ nm}$) até o ultra-violeta próximo ($300\text{-}320 \text{ nm}$) (VOGEL, 2008).

2.2.2.2 Recipientes para Amostra

O recipiente que contém a amostra a ser analisada é denominado célula ou cubeta. Esse recipiente deve ser construído de um material que permita a passagem de radiação na região de interesse. Para a região visível do espectro, existem diversos materiais os quais

as cubetas podem ser confeccionadas, desde materiais com custo elevado, como quartzo, a materiais baratos, como vidro de silicato ou plástico. Cubetas de vidro de silicato podem ser usados na região entre 350 *nm* a 2000 *nm* (VOGEL, 2008).

2.2.2.3 Aquisição Multicanal

Transdutores de radiação são dispositivos que convertem energia radiante em um sinal elétrico. Existem transdutores de radiação com diversos tipos de materiais em sua estrutura, como: fotodiodos, capacitores, fototransistores, piezoelétricos, etc.

Para uma aquisição multicanal utilizam-se transdutores de radiação com arranjo linear. Os mais comuns são arranjos de fotodiodos (PDA), arranjo de transistores (CMOS) e dispositivos de acoplamento de carga (CCD).

O CCD, do inglês *Charge-Coupled Device* (Fig. 6), é um dispositivo que consiste de centenas a milhares de pequenos detectores dispostos linearmente ao longo do comprimento do encapsulamento de um chip de silício. No mercado, podem ser encontrados diversos tipos de CCD, contendo de 256 a 10680 elementos no mesmo encapsulamento, e esses elementos de imagem, ou também, pixels, possuem dimensões de 50 μm até 2.625 μm (TOSHIBA, 2013).

O CCD recebe este nome em virtude do processo de movimento de cargas. Este processo é unidirecional. Um circuito de *clock* controla o movimento dessas cargas, e a leitura do sinal elétrico é feito na extremidade do dispositivo.

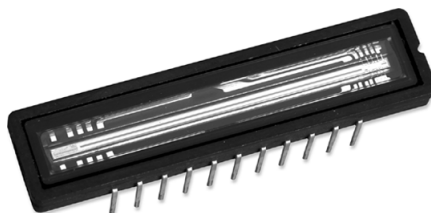


Figura 6: Dispositivo de acoplamento de Carga, CCD.

2.2.2.4 Processamento da Informação

O sinal elétrico gerado por um CCD é analógico, de alta frequência e baixa amplitude (TOSHIBA, 2013). Dado tais características, é necessário um circuito eletrônico capaz de conformar o sinal de saída do CCD, processá-lo e emitir uma saída, que nesse caso é gerar um espectro de absorbância, para que um usuário possa assimilar essa informação. Em sistemas desse tipo, é feito uma instrumentação analógica, formada por amplificadores operacionais e filtros analógicos, a fim de se manipular o sinal com operações matemáticas, como aplicar um ganho ou corrigir um nível de *offset*, e delimitar a banda de operação do sinal.

O estágio posterior a instrumentação analógica envolve a digitalização do sinal. Nesse contexto, digitalizar é amostrar o sinal analógico, isto é, transformar seu domínio contínuo em discreto, e, em seguida, quantizar o seu contra-domínio, para que este sinal possa ser inserido em um sistema computacional. Na figura 7, é mostrado, de maneira didática, o efeito causado no sinal pela digitalização.

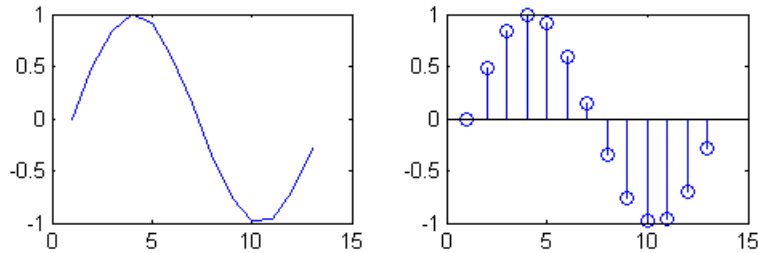


Figura 7: Representação do efeito da digitalização em um sinal de uma dimensão.

A digitalização de um sinal analógico é realizado através um dispositivo eletrônico chamado conversor analógico-digital (ADC). Um ADC possui um fundo de escala que é delimitado por dois níveis de tensão. Sua quantização é fornecida em uma quantidade de bits. Por exemplo, se um determinado ADC tem um fundo de escala de 0V a 5V com quantização de 10 bits, isso significa que o contra-domínio do sinal analógico deverá assumir valores entre 0V e 5V, e o sinal digitalizado poderá assumir 1024 valores (2^{10}). A quantização insere um erro no processo, onde um sinal com um contra-domínio de tamanho infinito passa para um contra-domínio discreto e finito. A amplificação, descrita no estágio anterior, tem como função minimizar o erro de quantização, amplificando o sinal analógico de maneira a cobrir todo o fundo de escala do ADC.

O processamento digital em um espectrofotômetro com CCDs envolve três aquisições principais:

- Corrente de escuro do arranjo
- Espectro da fonte (branco)
- Espectro bruto da amostra

O valor da corrente de escuro deve ser subtraído em ambos espectros (amostra e branco) com o intuito de cancelar o ruído ambiente. Em seguida, o espectro de transmitância é calculada dividindo o espectro bruto da amostra (retirado o valor da corrente de escuro) pelo espectro do branco. Por último, determina-se o espectro de absorbância tomando o logaritmo do inverso da transmitância calculada.

3 Metodologia

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho consistiu, basicamente, em adotar uma visão de sistema sobre um espectrofotômetro. Esse sistema foi dividido em dois grandes módulos: um óptico e um eletrônico. Na figura 8 tem-se uma representação destes módulos, e como estes estão interconectados, dando forma geral ao sistema. Cada módulo foi dividido em um conjunto de módulos, para que se pudesse ser feito uma análise separada de cada componente.

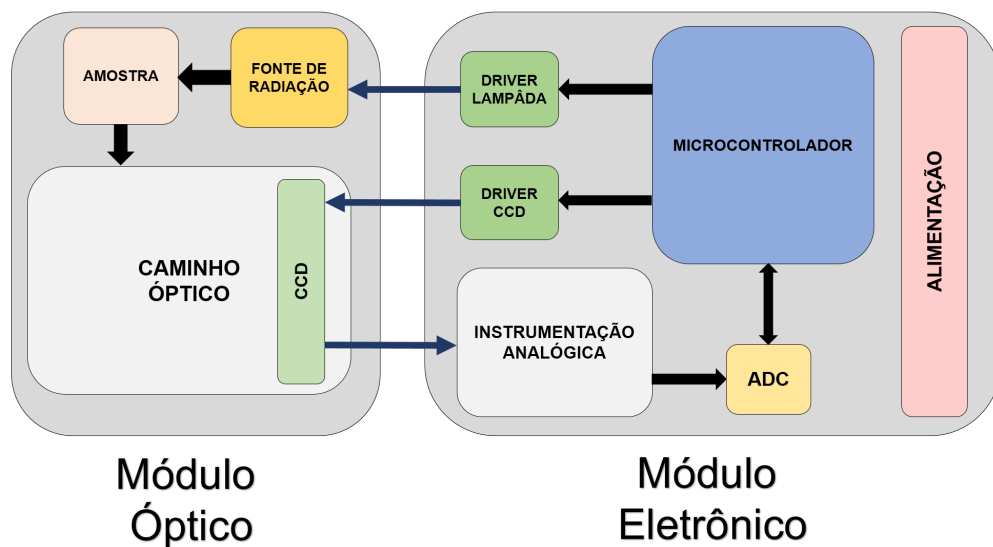


Figura 8: Visão em blocos do sistema.

3.1 Módulo Óptico

3.1.1 Caminho Óptico

O arranjo óptico escolhido para a construção do espectrofotômetro foi um monocromador de rede tipo Czerny-Turner, que consiste de uma fenda, um espelho colimador, uma grade de difração e um espelho focalizador (figura 9).

A fenda de entrada limita a largura do feixe, tendo impacto direto na resolução espectral. O espelho colimador tem como objetivo colimar os feixes de radiação, isto é, torná-los paralelos, e direcioná-los para a rede de difração. Na rede de difração ocorre a separação dos comprimentos de onda do feixe incidente. Por último, um espelho focalizador direciona os feixes dispersos para o seu plano focal, aonde deve ser posicionado o CCD.

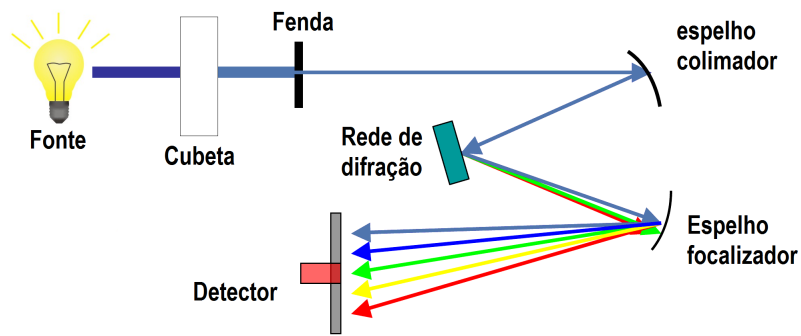


Figura 9: Arranjo óptico utilizado na confecção do espectrofotômetro.

3.1.2 Fonte de Radiação

Como fonte de radiação, utilizou-se uma lâmpada de tungstênio-halogênio com potência de 5 watts. Como já citado anteriormente, essa lâmpada possui uma emissão espectral contínua, com uma boa emissividade entre 400 nm a 800 nm (quando alimentada com tensão superior à 8.5 V), contemplando todo o espectro visível. A lâmpada foi alimentada em uma fonte de tensão DC ajustável. O seu acionamento é feito pelo microcontrolador, através de um *driver*.

3.2 Módulo Eletrônico

3.2.1 Microcontrolador

Para realizar o controle do CCD, a leitura do ADC e a comunicação entre módulo espectrofotômetro e computador foi selecionado o microcontrolador LPC2148 da NXP. O LPC2148 pertence a família LPC2000, que são um conjunto de processadores de 32 bits de alta performance, com um ARM7 como núcleo de processamento, e capaz de operar a uma frequência de até 60 MHz.

O LPC2148 possui 512 kB de memória *flash* para *firmware*, 32 kB de memória RAM, interfaces de comunicação RS-232, RS-485, SPI, I²C, além de periféricos como *timers*, PLL e dispõe de um controlador USB. Essas características fazem com que este microcontrolador seja escolha para diversas aplicações embarcadas.

3.2.2 Controle do CCD

O CCD escolhido para desenvolvimento deste trabalho foi o TCD1201D, da Toshiba. A escolha deste dispositivo foi baseada na resposta espectral, quantidade de elementos de imagem e o custo. O TCD1201D possui uma resposta espectral suficiente para atender a

região espectral visível como observado na figura 10. Ele possui 2048 pixels efetivos, com $14\ \mu\text{m}$ de largura em cada elemento.

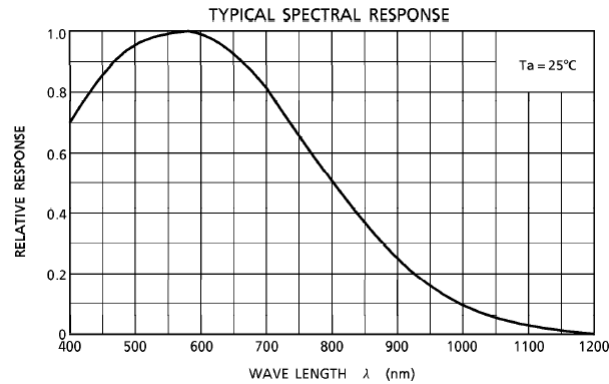


Figura 10: Resposta espectral do TCD1201D. Retirado de (TOSHIBA, 1997).

O dispositivo trabalha com tensão de 5 Volts, e opera com frequências de *clock* entre 20 kHz e 2 MHz. O tempo de integração deste sensor, isto é, o tempo de uma aquisição com os 2048 elementos, varia de 104.7 ms a 1.047 ms, tempo este que é controlado de acordo com a frequência do *clock*.

O TCD1201D é controlado diretamente pelo LPC2148, via *software*, através dos pinos de I/O e interfaceados por um *buffer*, SN7407, com o objetivo de converter os pulsos de 3.3 V do microcontrolador em pulsos de 5 V, necessários para correto funcionamento do TCD1201D. Na figura 11 é mostrado um diagrama simplificado do interfaceamento de um pino de I/O qualquer do microcontrolador e um pino qualquer de controle do CCD.

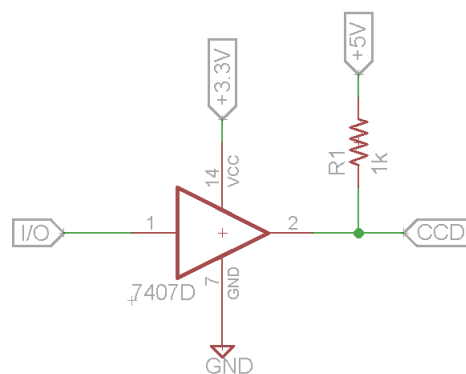


Figura 11: Interfaceamento entre um pino de I/O do LPC2148 e um pino de controle do CCD.

Ao todo, são 5 sinais digitais de controle (SH, $\phi 1$, $\phi 2$, RS e BT) e 2 saídas analógicas (OS e DOS). Os sinais $\phi 1$ e $\phi 2$ são os *clocks* principais do dispositivo, com defasagem de 180° um em relação ao outro. Eles determinam a frequência do sinal de cada *pixel*. SH é o sinal que marca o início e final de cada leitura. Um pulso é emitido na leitura do último

elemento. O diagrama com a forma de onda de cada sinal pode ser visto em Anexo A. A saída DOS define o nível de tensão máximo de saída, enquanto que o sinal OS contém a saída com os pixels, porém, inversamente proporcional a incidência de luz. A subtração DOS-OS fornece o sinal de interesse para o espectrofotômetro. Este sinal diferencial é diretamente proporcional a incidência de luz sobre cada pixel, e nada mais é do que a inversão linear do sinal OS. A faixa dinâmica de amplitude deste sinal é pequena, de cerca de 100 mV apenas, e portanto deve ser amplificado para uma melhor quantização.

3.2.3 Conformação e Digitalização do Sinal

3.2.3.1 Instrumentação Analógica

Dada a informação de que o sinal de interesse possui cerca de 100 mV de faixa dinâmica e que o mesmo é proveniente de uma subtração de sinais, faz-se necessário uma amplificação diferencial. Para isso foi projetado um circuito com amplificadores operacionais, dividido em três estágios: amplificação diferencial, correção de *offset* e amplificação com ajuste de ganho. Para a implementação do circuito, optou-se pelo dispositivo TL084, que consiste de quatro amplificadores operacionais em um único encapsulamento voltado para aplicações de baixo ruído.

O primeiro estágio (figura 12) é um circuito subtrator, que realiza a operação matemática de subtração de suas entradas, tendo como saída a diferença entre o sinal da entrada não-inversora do amplificador, que neste caso é o sinal DOS do CCD, e o sinal da entrada inversora, que é o sinal OS do CCD. Os resistores foram escolhidos para que o circuito possua ganho unitário nesse estágio, ou seja, a saída diferencial é exatamente DOS-OS.

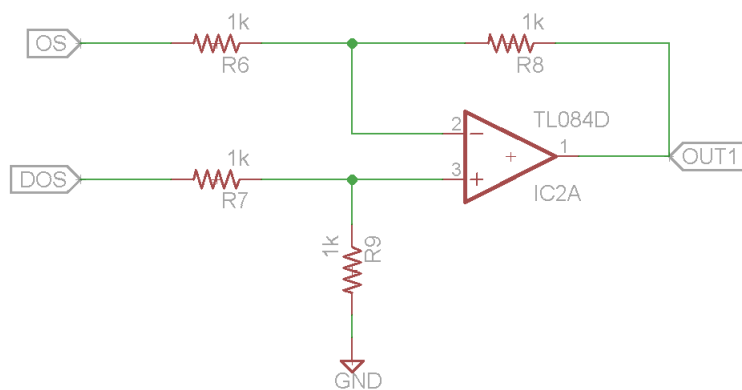


Figura 12: Circuito de amplificação diferencial.

O segundo estágio tem como objetivo fazer uma correção de *offset* no sinal, isto é, ajustar a componente DC do mesmo, para que no estágio seguinte, o ganho no sinal possa ser maximizado. Observou-se experimentalmente que o sinal DOS-OS possui um nível DC positivo, que varia entre 100 mV até cerca de 800 mV. A correção deste valor se mostra

importante pois ele influencia diretamente na linha de base do espectro. A topologia desse estágio é a mesma do estágio anterior, um circuito diferencial com ganho unitário. Como o nível DC desse sinal é sempre positivo, na entrada inversora do amplificador colocou-se um potenciômetro para ajustar o *offset*. O circuito foi projetado para fazer uma correção de até 1 V e é mostrado na figura 13.

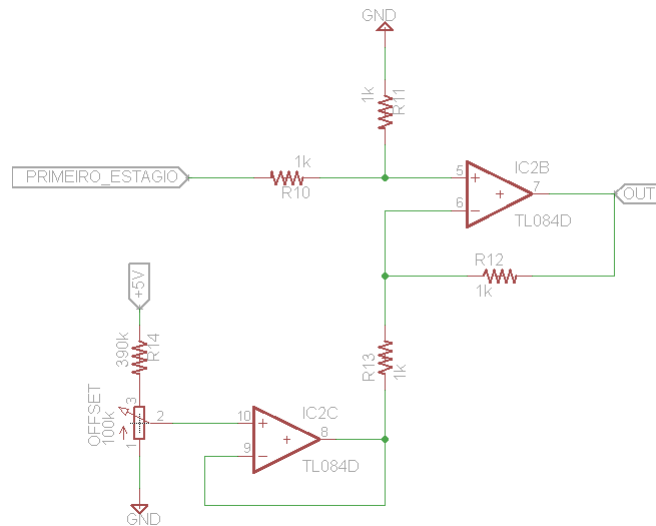


Figura 13: Circuito de correção de *offset*.

O terceiro estágio é formado por um circuito amplificador não-inversor com ajuste de ganho feito por um potenciômetro. O circuito foi projetado para ajustar um ganho de 1 até 50 vezes em relação ao sinal de entrada.

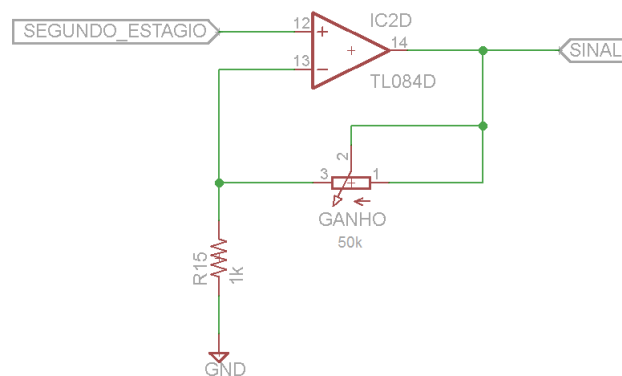


Figura 14: Circuito com ajuste de ganho referente ao terceiro estágio.

A alimentação do TL084 foi feita por uma fonte simétrica gerada a partir de um fonte simples, utilizando-se um conversor chaveado DC-DC para gerar tensão negativa a partir de uma tensão positiva. O circuito integrado escolhido para realizar a conversão de tensão foi o ICL7660, da Maxim. A configuração deste circuito foi retirado da folha de dados do dispositivo (MAXIM, 1994), e está representado na figura 15.

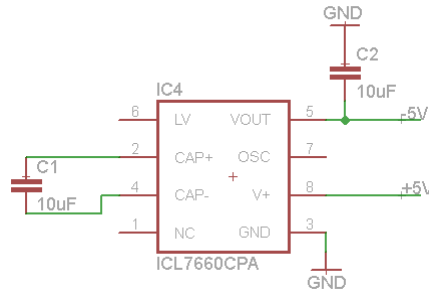


Figura 15: Circuito conversor chaveado DC-DC.

3.2.3.2 Digitalização do Sinal

Após a etapa de amplificação, o sinal amplificado é inserido em um conversor analógico-digital (ADC). Para esta etapa foi escolhido o dispositivo MCP3201, da Microchip. Este conversor possui 12 bits de resolução, ou seja, o sinal convertido é quantizado em 4096 níveis. Esse dispositivo gasta $10 \mu s$ para converter uma amostra, e opera com tensões de $2.7 - 5.5 V$. A saída desse conversor é dada através de um barramento SPI e possui 3 sinais de controle: MISO, CLK e CS. CLK é o *clock* do ADC. CS é um sinal que controla o acionamento do dispositivo. MISO é a saída serial quantizada na forma de um trem de pulsos. Observa-se que a taxa de amostragem passa a ser um fator limitante em relação ao tempo de integração do CCD. Um tempo de conversão (T_S) de $10 \mu s$ entre cada amostra implica em que cada pixel deva estar exposto por pelo menos T_S segundos. O impacto disso é um tempo de integração mínimo teórico de 20.94 ms, calculado pela equação 3.1:

$$T_{int} = 2094 \cdot 10\mu s = 20.94ms \quad (3.1)$$

A equação 3.1 mostra que o tempo de integração mínimo aumenta em 20 vezes em relação ao menor tempo de integração que o CCD pode fornecer, porém ainda está dentro de uma faixa razoável para este propósito.

3.2.4 Circuito de Acionamento da Lâmpada

Como descrito anteriormente, o acionamento da lâmpada é feito por um *driver* controlado pelo microcontrolador. A razão para a utilização de um *driver* é o consumo de corrente elevado por parte da lâmpada que o microcontrolador não é capaz de fornecer, além de que os níveis de tensão são diferentes, sendo que o LPC2148 trabalha com tensões de 0-3.3V e a lâmpada necessita de um pouco mais de tensão para atingir a sua temperatura de trabalho, onde a emissão contempla todo o espectro visível.

O circuito montado consiste de um transistor de potência ligado em um pino de I/O do microcontrolador. O transistor utilizado foi um TIP121, que é um do tipo Par

Darlington, com junção NPN, que pode operar com tensões de até 80 V DC e é capaz de fornecer uma corrente de até 5 ampères. A figura 16 contém o diagrama do circuito de *driver* implementado.

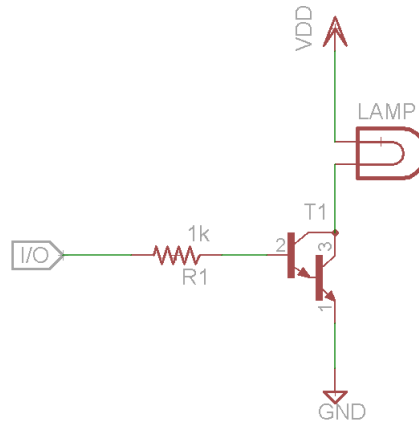


Figura 16: Circuito de acionamento da lâmpada.

3.2.5 Firmware

Para acionar a lâmpada, controlar o CCD, realizar aquisição de dados via ADC e a transmissão de dados para um computador, foi implementado um *firmware* no LPC2148, com o intuito de atender os requisitos citados. A rotina elaborada consiste em configurar todos os periféricos necessários e em seguida, manter a fonte de radiação sempre ligada e o CCD fazendo aquisições a todo momento, de modo que não haja carga acumulada nos pixels. Após cada aquisição, é verificado se o microcontrolador recebeu o comando de enviar os dados adquiridos, e, em caso positivo, é realizada a transmissão dos dados. Caso não haja o comando de enviar os dados, é feita nova aquisição sobrescrevendo os dados anteriores. Na figura 17 é mostrado um fluxograma simplificado dessa rotina.

O *firmware* implementado faz uso de cinco periféricos que o LPC2148 dispõe:

- PLL
- GPIO
- Timer
- Interface RS-232
- Interface SPI

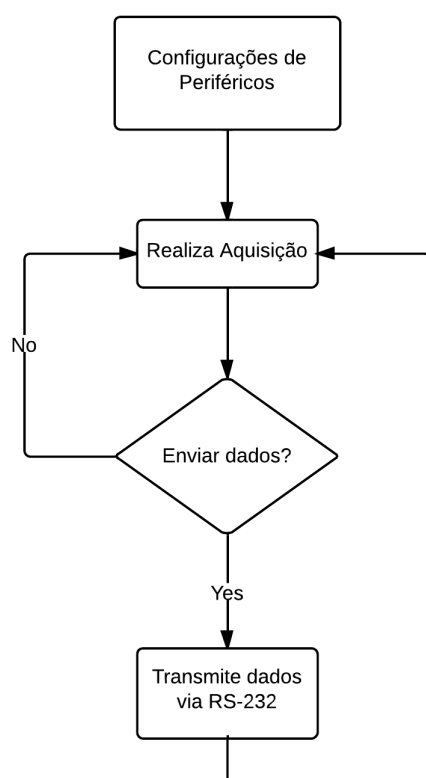


Figura 17: Fluxograma simplificado do *firmware* embarcado no LPC2148.

3.3 Metodologia de Validação

Para validar os espectros que o espectrofotômetro construído adquire, foram realizados três sessões de testes: calibração do equipamento, aquisições na região do vermelho e aquisições na região violeta do espectro visível.

Para calibrar o espectrofotômetro construído, utilizou-se uma lâmpada de Hg/Ar no lugar da lâmpada de tungstênio. A lâmpada de Hg/Ar tem a propriedade de emitir picos em pequenos intervalos de comprimento de onda, caracterizando sua emissão como uma emissão de espectro de linhas, como pode ser visto na figura 18.

O objetivo dessa calibração é fazer o mapeamento entre pixel e comprimento de onda nos espectros adquiridos. Esse procedimento consiste em adquirir o espectro de linhas, e localizar os pixels onde estão os picos no espectro, e, com uma regressão polinomial, determinar a relação entre pixel e comprimento de onda, baseado em um espectro como o da figura 18.

3.3.1 Análise das Medidas de Absorção

Para os testes de absorção no extremo azul, foram adquiridos espectros de soluções de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), com concentrações de: $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,

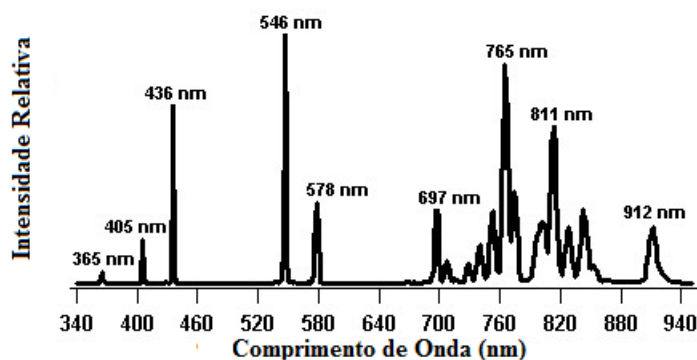


Figura 18: Espectro de uma lâmpada de Hg. Adaptado de (GORE, 2000).

$0.025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.0125 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.00625 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.003125 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

Para os testes de absorção no extremo vermelho, foram utilizadas soluções de sulfato de cobre (CuSO_4) com concentrações de: $0.032 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.016 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.008 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.004 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.002 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.001 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

O motivo de se utilizar soluções que absorvem nos extremos do espectro visível é que nessas regiões o CCD possui uma resposta relativa menor (figura 10), e assim é possível determinar qual será o máximo erro nas medidas.

4 Resultados e Discussão

4.1 Construção do Protótipo

O protótipo construído seguiu a mesma linha descrita na metodologia, ou seja, foram feitos dois módulos que, em conjunto, constituem um espectrofotômetro. A cavidade óptica foi usinada em alumínio, e anodizada em preto, visando uma menor interferência, principalmente nas medidas de corrente de escuro. O módulo pode ser visto na Fig. 19.

O *hardware* eletrônico foi construído em uma placa do tipo *perfboard*, que é uma placa de cobre para prototipagem de circuitos eletrônicos. Todos os componentes eletrônicos foram adquiridos no mercado nacional. Os resistores utilizados são todos com precisão de 1% sobre seu valor.

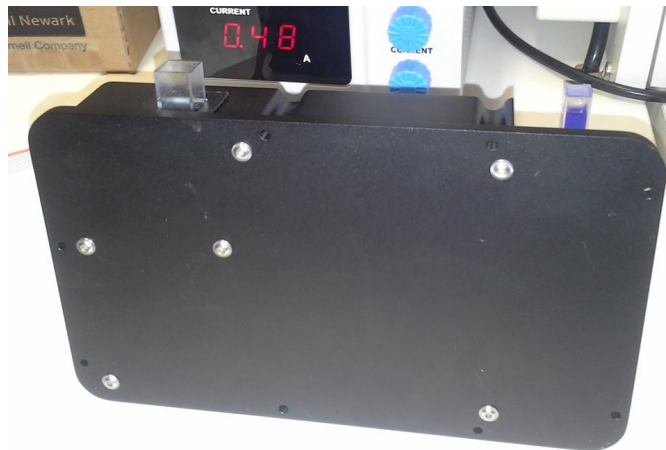


Figura 19: Módulo óptico construído.

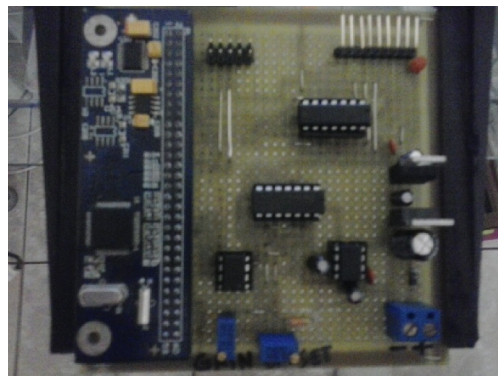


Figura 20: Hardware eletrônico construído.

4.2 Calibração

Para a calibração do espectrofotômetro, foi coletado um espectro de uma lâmpada de Hg/Ar, e alguns picos foram identificados visualmente, de acordo com o espectro fornecido pelo fabricante da lâmpada. Foram identificados cinco linhas espectrais, conforme a Tab. 1.

Pixel	Amplitude (counts)	Comprimento de Onda (nm)
349	436	405
702	746	500
877	2837	546
1036	1679	578
1938	922	765

Tabela 1: Picos da lâmpada de Hg/Ar coletados.

A relação entre pixel p e comprimento de onda λ foi obtida através de uma regressão polinomial de terceira ordem. O grau da regressão foi escolhido empiricamente visando obter uma melhor relação. O polinômio obtido foi:

$$\lambda(p) = 1.2151 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 - 5.8178 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 + 2.924 \cdot 10^{-1} \cdot p + 318.31013 \quad (4.1)$$

onde λ está em nm , e p é a posição do pixel (1 - 2048).

A Figura 21 apresenta os pontos coletados presentes na Tab. 1 plotados junto com a curva do polinômio obtido via regressão polinomial de ordem 3.

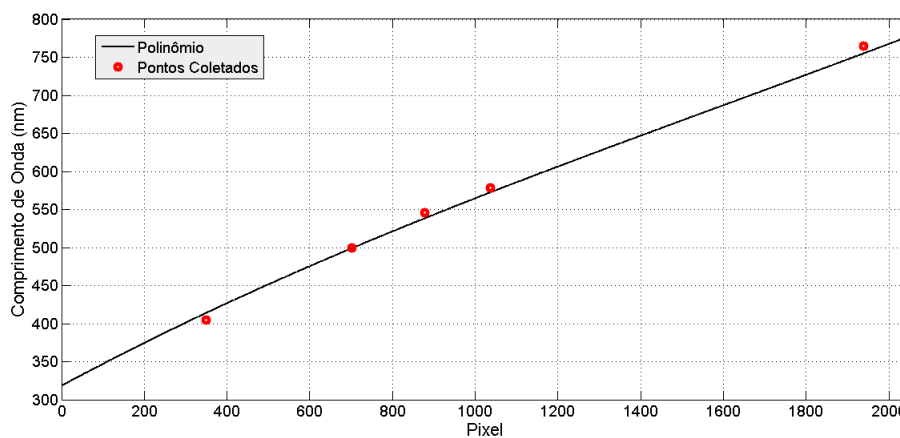


Figura 21: Pontos coletados e curva do polinômio obtido da regressão.

O espectro da lâmpada de Hg/Ar, com o eixo das abscissas ajustado, pode ser visto na Fig. 22.

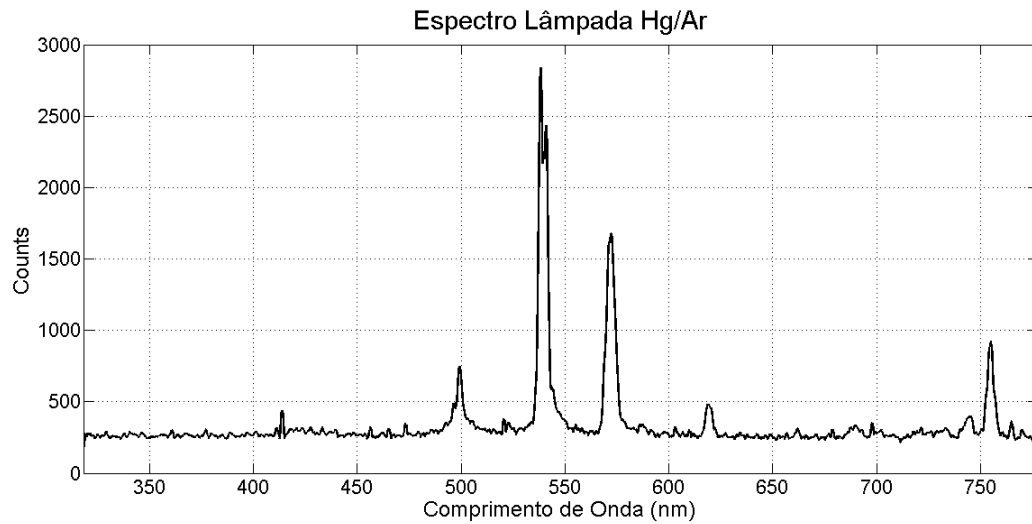


Figura 22: Espectro da lâmpada de Hg/Ar.

O espectro de linhas obtido coincide com o esperado, entretanto, alguns picos não foram detectados pelo espectrofotômetro. Para a detecção mostrada na Fig. 22, foi configurado um tempo de aquisição de 250 ms, tempo bem superior ao utilizado nas aquisições de espectros de amostras. Um aumento no tempo de aquisição acarreta em um aumento no ruído do espectro, e no espectro de linhas não é diferente. Para contornar esse problema, o sinal foi filtrado com uma média-móvel simples, com janela de 4 elementos.

4.3 Aquisições

4.3.1 Avaliação da Fonte de Radiação

Conforme descrito anteriormente, uma lâmpada de tungstênio foi utilizada como fonte de radiação. O espectro da mesma foi registrado na Fig 23. Observa-se que há uma distorção periódica no espectro. Essa distorção é proveniente da rede elétrica alternada, e influencia com componentes de frequência bem características, principalmente em 60 Hz e 120 Hz. Para eliminar essas componentes, um filtro passa-baixa, do tipo FIR, com frequência de corte em 50 Hz, e com janela de 300 elementos foi convoluído com o sinal e o resultado pode ser visto na Fig. 23.

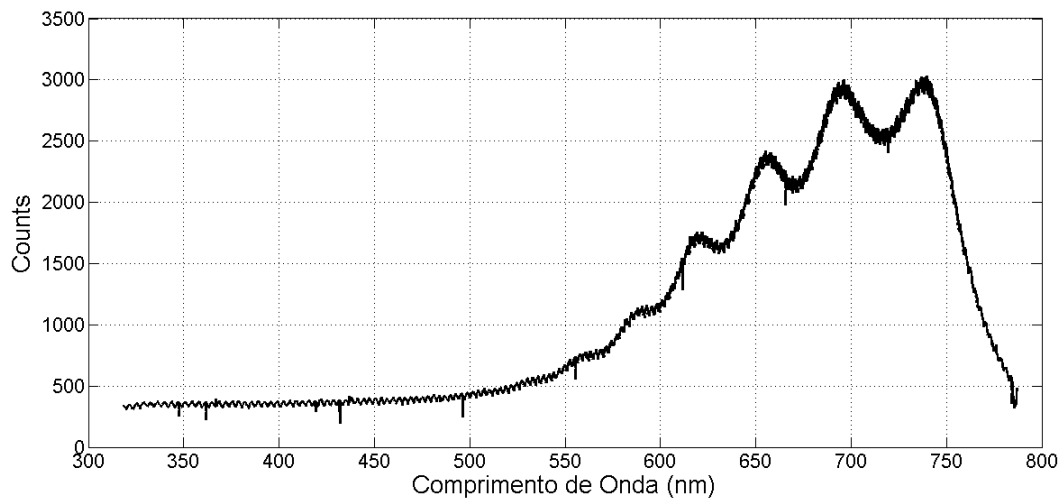


Figura 23: Espectro da Lâmpada de Tungstênio sem tratamento.

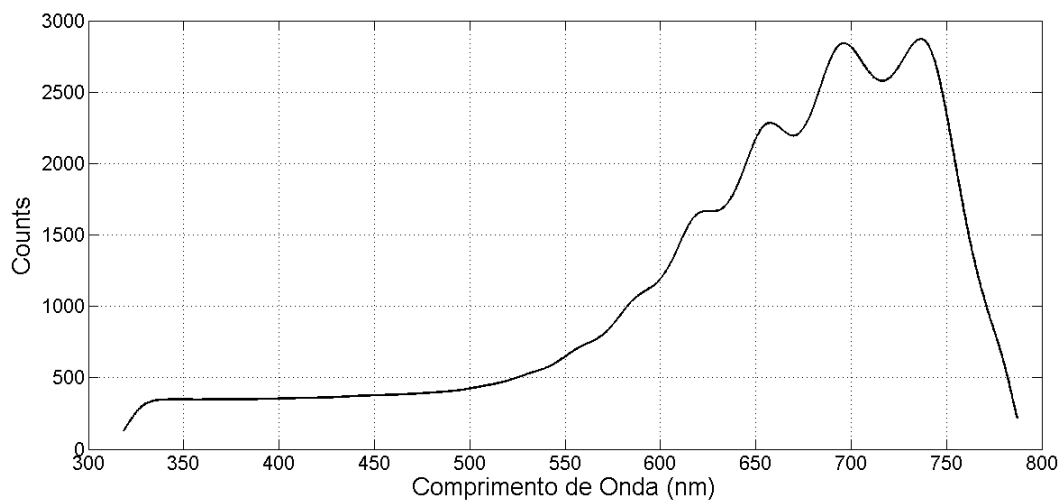


Figura 24: Espectro da Lâmpada de Tungstênio após filtragem.

4.3.2 Soluções de Sulfato de Cobre

Foram coletados seis espectros de soluções de CuSO_4 , com diferentes níveis de concentrações. Esse conjunto de espectros é mostrado na Fig. 25.

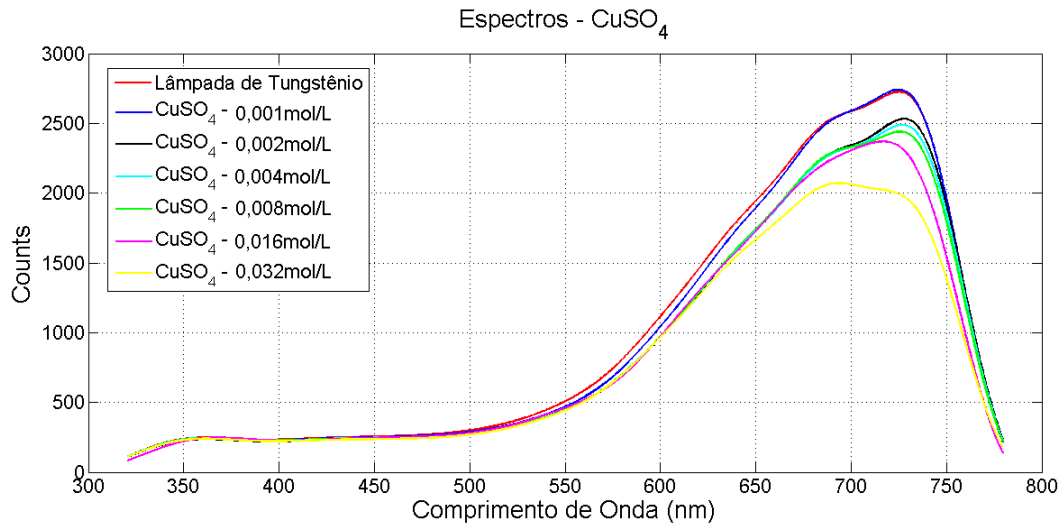


Figura 25: Espectros de emissão das soluções de CuSO_4 .

Na figura 26 estão os espectros de absorbância calculados a partir dos espectros de emissão das soluções.

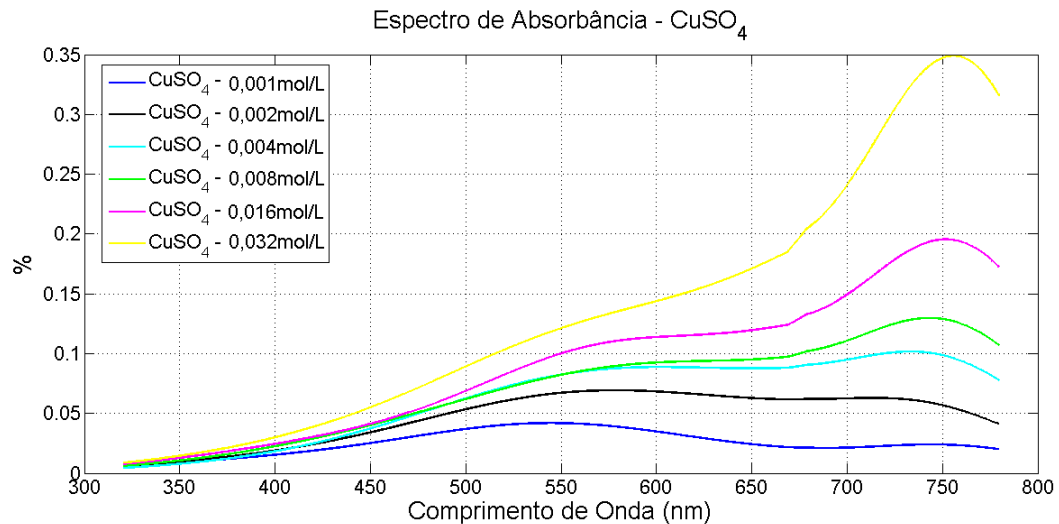


Figura 26: Espectros de absorbância das soluções de CuSO_4 .

Com os espectros de absorbância obtidos, uma reta vertical em 750 nm foi escolhida, empiricamente, como a reta que contempla o melhor conjunto de pontos para calcular a regressão das concentrações das amostras. Esse conjunto de pontos é mostrado na Tab. 2. Com estes valores foi realizada uma análise de regressão linear com valores cruzados, onde são utilizados cinco pares ordenados para a regressão, e a absorbância

do par ordenado restante é inserido no polinômio obtido para calcular o erro cruzado. A análise com valores cruzados para as soluções de CuSO_4 pode ser visto na Tab. 2.

Absorbância (%)	Concentração Real ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Concentração Prevista ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	Erro (%)	Coefficiente de Correlação R^2
0.025	0.001	0.00216	116	0.9875
0.060	0.002	0.00173	13.6	0.9671
0.111	0.004	0.00776	94.2	0.9867
0.132	0.008	0.00951	18.9	0.9735
0.195	0.016	0.01572	1.73	0.9696
0.341	0.032	0.02974	7.06	0.9009
Erro Médio:			41.9	

Tabela 2: Análise de regressão linear cruzada para as soluções de CuSO_4 . Os valores de absorbância foram retirados da reta 750 nm.

4.3.3 Soluções de Dicromato de Potássio

Foram coletados seis espectros de soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, com diferentes níveis de concentrações. Esse conjunto de espectros é mostrado na Fig. 27.

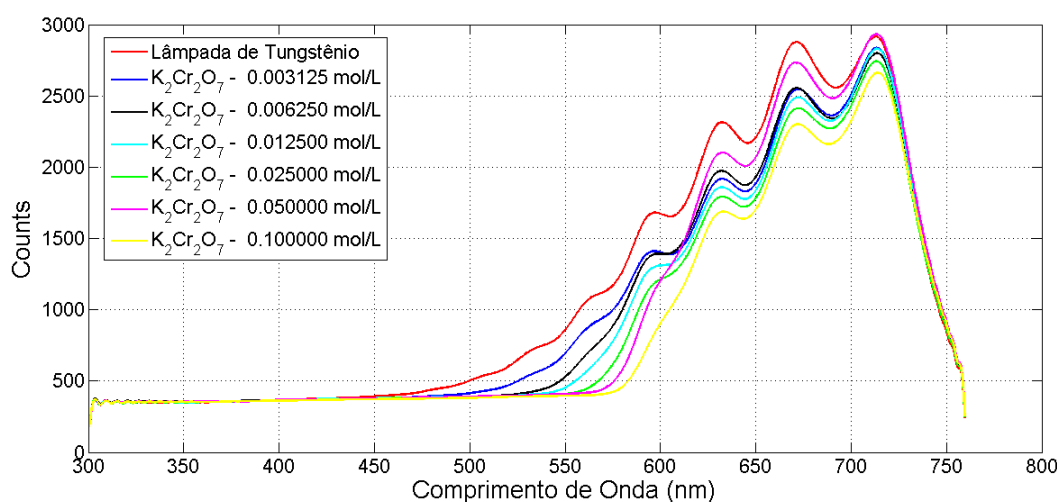


Figura 27: Espectros de emissão das soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Na figura 28 estão os espectros de absorbância calculados a partir dos espectros de emissão das soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Com os espectros de absorção obtidos, uma reta vertical em 570 nm foi escolhida como a reta que contempla o melhor conjunto de pontos para calcular a regressão linear das concentrações das soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Assim como na análise das soluções de CuSO_4 , também foi realizado uma análise cruzada. Os valores estão registrados na Tab. 3.

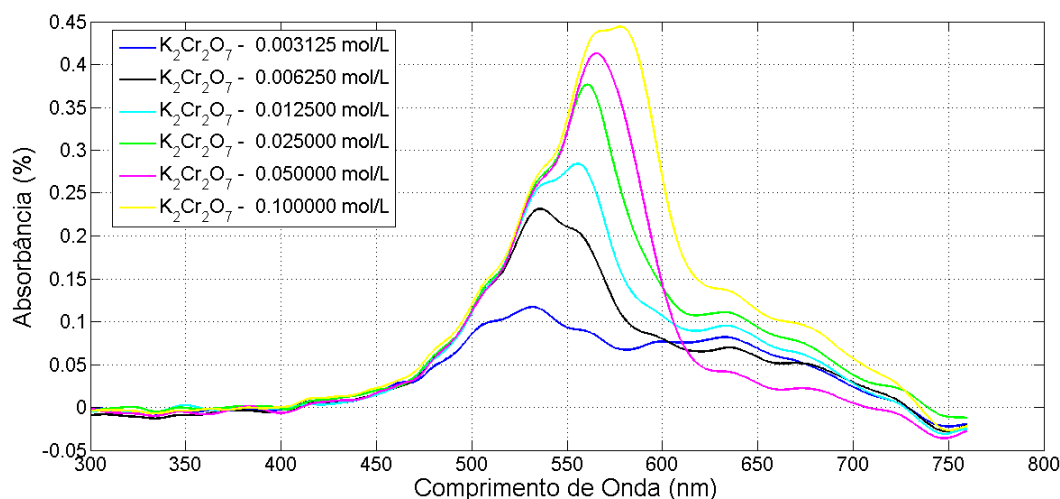


Figura 28: Espectros de absorvência das soluções de $K_2Cr_2O_7$.

Absorvência (%)	Concentração Real ($mol \cdot L^{-1}$)	Concentração Prevista ($mol \cdot L^{-1}$)	Erro (%)	Coefficiente de Correlação R^2
0.0676	0.003125	0.0037	18.6	0.9051
0.1094	0.006250	0.0061	2.40	0.8848
0.1585	0.012500	0.0162	29.7	0.8914
0.2530	0.025000	0.0206	17.4	0.9262
0.3566	0.050000	0.0683	36.7	0.9277
0.4440	0.100000	0.0604	39.6	0.9656
Erro Médio:			23.9	

Tabela 3: Análise de regressão linear cruzada para as soluções de $K_2Cr_2O_7$. Os valores de absorvência foram retirados da reta 570 nm.

4.4 Avaliação dos Resultados

A calibração feita com a Lâmpada de Hg/Ar se mostrou bastante eficaz para ajustar a escala de comprimento de onda nas aquisições. Entretanto, uma calibração de amplitude com a mesma lâmpada não pode ser realizada devido não ser possível identificar todos as linhas emitidas pela lâmpada na região visível, ainda que o tempo de integração do CCD tenha sido reduzido significativamente.

O resultado indicado na Fig. 21 comprova que todo o espectro visível está contemplado nas aquisições de dados. Entretanto, o espectro da lâmpada de tungstênio, mostrado na Fig. 24, indica que a resolução em amplitude entre 400-550 nm é baixa. Essa falta de resolução implicou diretamente nos resultados obtidos, e no índice de erro calculado, que se mostrou bastante alto para essa classe de equipamentos.

As aquisições com soluções de $CuSO_4$ foram feitas com o objetivo de avaliar quantitativamente a resolução do equipamento no extremo vermelho do espectro, visto que essas soluções absorvem nessa região, com um pico de absorção em 750 nm (Fig. 29).

A Tab. 2 mostra um erro médio elevado, acima de 40%. Entretanto, observa-se que erro tende a diminuir conforme a concentração da solução aumenta (Fig. 30).

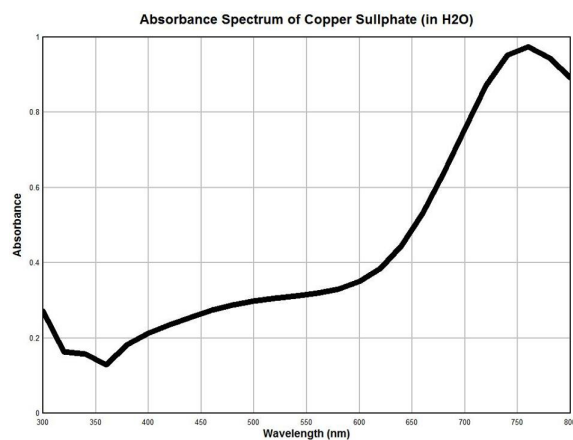


Figura 29: Absorção da solução de CuSO_4 .

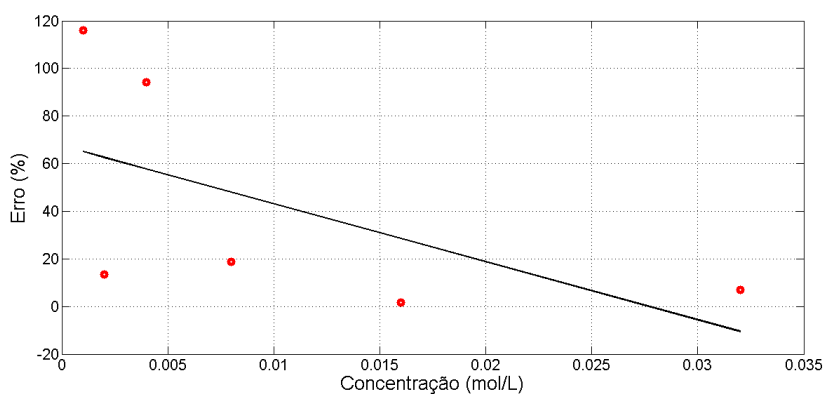


Figura 30: Relação entre erro e concentração para soluções de CuSO_4 .

As aquisições com soluções de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ foram feitas com o objetivo de avaliar quantitativamente a resolução do equipamento no extremo azul, início da região de absorção em soluções de dicromato de potássio. A Tab. 3 mostra um erro médio alto, acima de 20%, porém um pouco menor que o erro para as soluções de CuSO_4 .

5 Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma descrição sobre o funcionamento de um espectrofotômetro de feixe único voltado para aplicações na região visível e os conhecimentos necessários para o desenvolvimento de um equipamento do mesmo tipo. Uma breve análise sobre os componentes que compõem este tipo de equipamento revelou o grau de complexidade para uma empreitada como essa, principalmente porque a bibliografia presente trata o tema sem um aprofundamento técnico na área de engenharia, e muitos tópicos são abordados apenas de forma teórica.

O desenvolvimento da eletrônica responsável por controlar o espectrofotômetro construído teve como cerne o microcontrolador LPC2148. A escolha por um processador ARM se mostrou uma boa solução, pois os requisitos impostos foram atendidos com esse dispositivo. O LPC2148 foi utilizado para relacionar controlar o interfacear o conjunto, consistindo em controlar uma fonte de radiação e um transdutor de radiação, realizar a leitura deste transdutor, e transmitir essa aquisição para um computador através de uma interface serial.

Para validar o trabalho desenvolvido, foram feitos três sessões de aquisições. No primeiro teste foram adquiridos espectros de uma lâmpada de Hg/Ar, que tem a propriedade de emitir um espectro de linhas, para calibrar o eixo de comprimento de onda e enquadrar o espectro visível dentro da área de exposição do CCD. Nos dois testes restantes foram analisadas soluções de CuSO_4 e $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, com o intuito de verificar quantitativamente as medidas adquiridas com o equipamento construído.

Os resultados obtidos, de maneira geral, foram satisfatórios. Entretanto as análises demonstraram que não foi possível validar o espectrofotômetro construído como um equipamento de alta precisão, pois o grau de erro associado as medidas foi considerado elevado.

Como perspectivas futuras, é sugerido um refinamento na metodologia de concepção de um espectrofotômetro, utilizando outras abordagens, como componentes eletrônicos dedicados e outros tipos de configurações do sistema óptico. Testes com outros tipos de transdutores de radiação, além de uma análise mais precisa no controle de fontes de emissão também se mostram pertinentes.

Referências

- CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*. 1ª. ed. [S.l.]: Elsevier, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 26.
- GORE, M. G. *Spectrophotometry and Spectrofluorimetry: A Practical Approach*. [S.l.]: Oxford, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 9, 24, 25 e 37.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics Extended*. 10ª. ed. [S.l.]: Wiley, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- HOLLER, F. J. et al. *Princípios de Análise Instrumental*. [S.l.]: Bookman, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- MAXIM. *MAX1044/ICL7660, Switched-Capacitor Voltage Converters*. [S.l.], 1994. Disponível em: <<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/ICL7660-MAX1044.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2013. Citado na página 33.
- SKOOG, D. A. et al. *Fundamentos de Química Analítica*. 8ª. ed. [S.l.]: Thomson, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 9, 19, 21 e 23.
- TOSHIBA. *Toshiba CCD Linear Image Sensor: TCD1201D, Datasheet*. [S.l.], 1997. Disponível em: <<http://www.stellarnet-inc.com/public/download/TCD1201D.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2013. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 31 e 53.
- TOSHIBA. *Single-Layer CCD Technology for Linear CCD Image Sensors*. [S.l.], 2013. Disponível em: <http://www.toshiba.com/taec/components/WhitePaper/06H09_TCD29714.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2013. Citado na página 27.
- VOGEL, A. I. *Análise Química Quantitativa*. 6ª. ed. [S.l.]: LTC, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26 e 27.

Anexos

ANEXO A – Diagrama de Pulsos de Controle do CCD

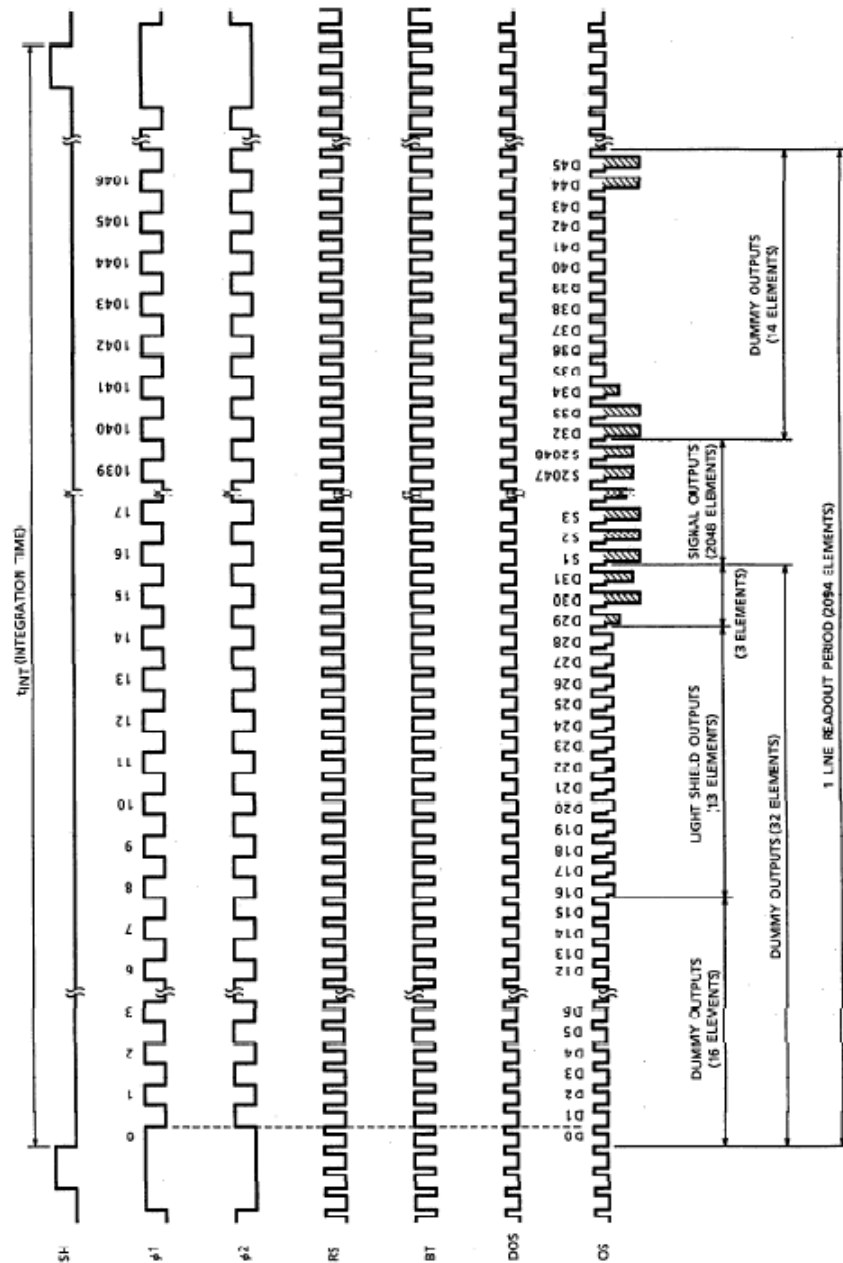


Figura 31: Diagrama de pulsos de controle do TCD1201D. Retirado de (TOSHIBA, 1997).

ANEXO B – Circuito Implementado

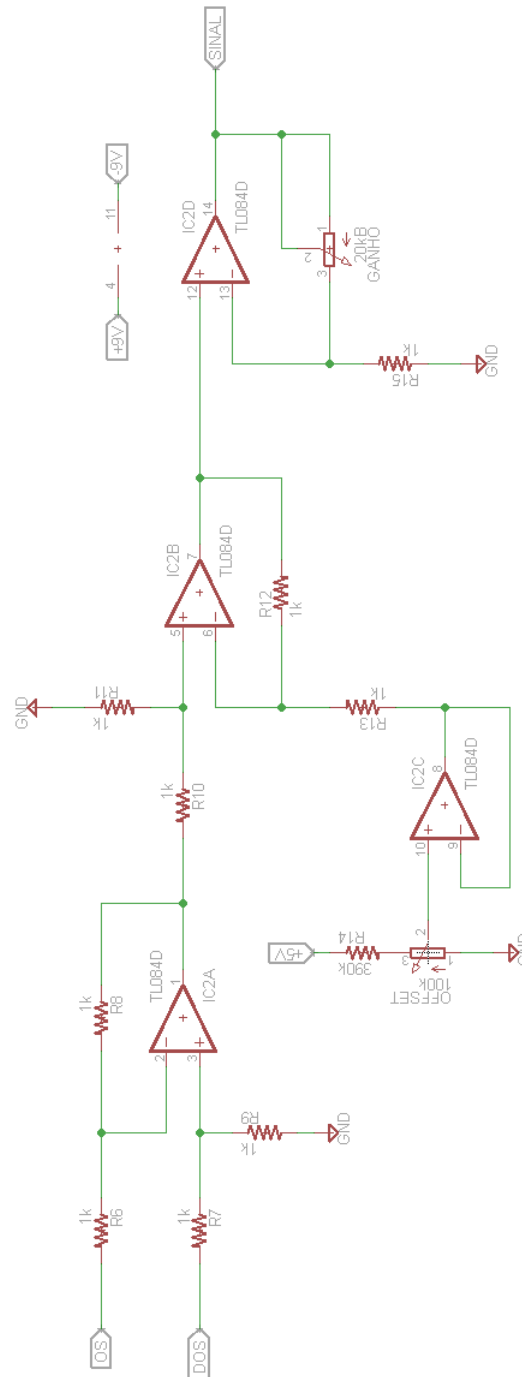


Figura 32: Circuito de instrumentação analógica do sinal de proveniente do CCD.

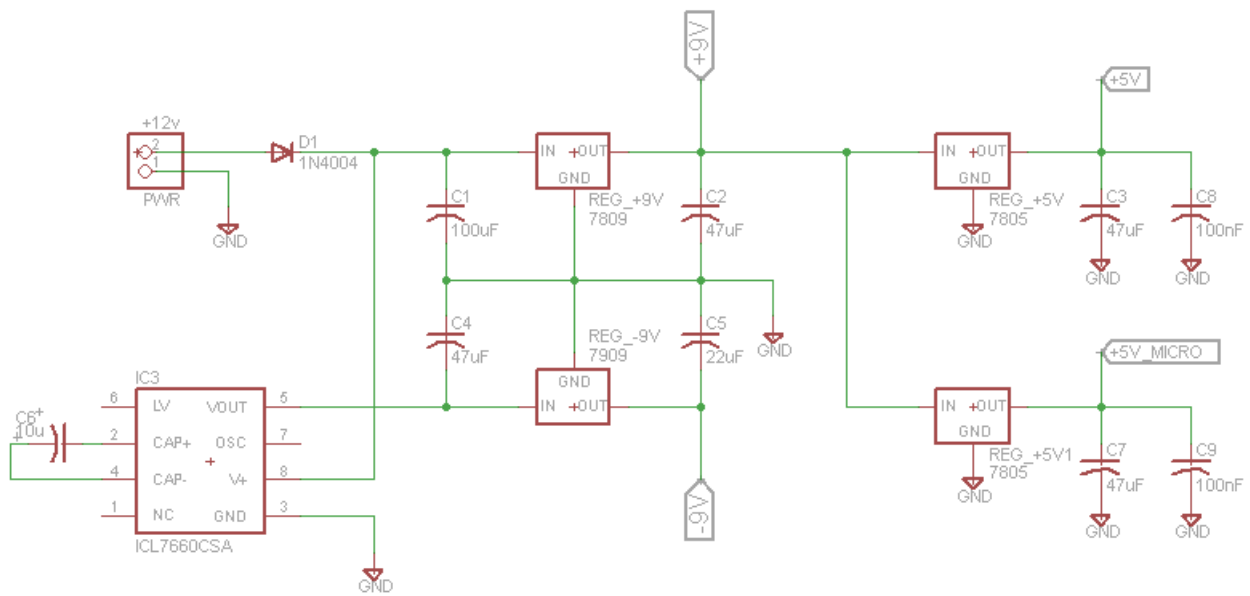
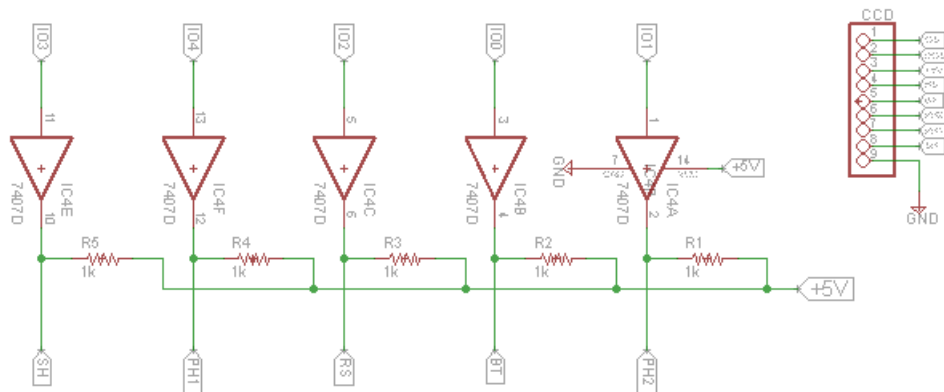


Figura 33: Circuito de alimentação.

Figura 34: Circuito de *driver* do CCD.